

# 下向き閉塞分岐配管に生じる流動挙動に関する研究 (分岐管形状が流動挙動に与える影響)

Flow Structure in a Downward Branch Pipe with a Closed End  
(Effect of Branch Pipe Shapes on Flow Structure)

三好 弘二 (Koji Miyoshi) \*<sup>1</sup>      中村 晶 (Akira Nakamura) \*<sup>1</sup>  
竹中 信幸 (Nobuyuki Takenaka) \*<sup>2</sup>

**要約** 主配管から下方へ分岐し、内部に滞留した流体を有する下端部が閉塞された分岐配管では、分岐配管内にキャビティフローが発生し、主配管の高温水が分岐配管内に侵入する。その結果、急峻な温度勾配を有する熱成層界面が発生し、この界面の変動は、管壁の温度変動を引き起こし、熱疲労による貫通き裂が発生する場合がある。本研究では、主流の侵入深さの変動メカニズムを検討するため、これまでの円管に加え、矩形管、縮小管、拡大管を用いて、分岐管内の渦構造の可視化実験を行った。その結果、矩形の分岐管を用いた実験により、 $L = 4D_b$ 位置の断面で観察された管全体を支配する旋回流の発生が抑制され、主流の侵入深さの変動が抑制されることがわかった。分岐管が円管で一部を縮小管および拡大管にした場合、侵入深さの変動は観察されたが、その最大侵入深さは円管の場合に比べ、小さくなった。

**キーワード** キャビティフロー、熱成層、旋回流、分岐管

**Abstract** Flow in the main pipe induces a cavity flow in a downward branch pipe with a closed end. Hot water in the main pipe penetrates into the branch pipe and makes a thermal stratification with a large temperature gradient. The fluctuations of the thermal stratification causes temperature fluctuations in the wall and could lead to thermal fatigue cracks. The flow structure in the branch pipe was observed by experiments to investigate fluctuation mechanism for penetration depth. Experiments with a rectangular branch pipe were conducted to suppress the fluctuation of penetration depth induced by the main flow. It was shown that the fluctuation of penetration depth in the rectangular pipe was suppressed when the large swirl flow at  $L = 4D_b$ , which was observed in a round pipe, was not formed. The maximum penetration depth in a round pipe with a reducing and expanding section was smaller than that of the straight round pipe.

**Keywords** cavity flow, thermal stratification, swirl flow, branch pipe

## 1. 序論

主配管から下方へ分岐し、内部に滞留した流体を有する下端部が閉塞された分岐配管（以下、閉塞分岐配管）では、分岐配管内にキャビティフローが発生する。分岐配管の流体が主配管の流体よりも低温である場合には、このキャビティフローが主配管の高温水を分岐配管内へ輸送するため、そこで急峻な温度勾配を有する熱成層界面が発生する<sup>(1)</sup>。また、この熱成層界面の変動は、管壁の温度変動を引き起こし、原子力プラント配管において熱疲労による貫

通き裂を生じさせることが報告されている<sup>(2),(3)</sup>。

日本機械学会では、このような流体の温度変動に起因する高サイクル熱疲労を評価するため、「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」<sup>(4)</sup>（以下、指針）を策定した。図1に示すとおり水平配管を有する閉塞分岐配管では、高温の主流が曲がり部に到達した場合、水平配管部に滞留した冷水との熱成層界面が変動するため、有意な壁温変動が発生し、熱疲労による損傷が懸念される。よって、指針では、閉塞分岐配管滞留部の熱成層界面の変動による高サイクル熱疲労を防止するため、熱成層界面が曲がり

\*<sup>1</sup> (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

\*<sup>2</sup> 神戸大学工学部

部付近に存在しないよう主流の侵入深さを確認している<sup>(5),(6),(7)</sup>。

指針では実験で得られた知見を基に主流の侵入深さを評価しているため、その適用範囲は限られており、分岐配管内径43.1 mm (JIS 2B, sch160) 未満の配管に関する知見は不十分である。しかしながらプラント配管には、ドレン配管やプロセス計器への取り出し配管などの内径43.1 mm 未満の配管も多数存在することから、その知見拡充は重要である。

著者らは、これまで分岐管内径 $D_b = 43$  mm 以下の下向き閉塞分岐配管を対象に分岐管内の流動状態を調べ、以下の知見を明らかにしている。

- (1) 分岐管側面から観察した流動挙動は図2に示すとおり鉛直方向に回転するキャビティフローの領域1、流れが乱れた遷移領域、旋回状の下降流れと中心付近の上昇流が見られる領域2から形成される<sup>(8),(9)</sup>。
- (2) 主配管底部からトレーサ粒子の動いている位置までを主流の侵入深さと定義した場合、図2に示すとおりその侵入深さ $L_s$ は変動する<sup>(8),(9)</sup>。
- (3) 図2で示した領域1および遷移領域における分岐管断面の渦構造を観察した結果、図3に示すとおり (a) キャビティフローの一部と考えられる断面に平行な流れ、(b) 複数の小さな渦が形成される流れ、(c) 管全体を支配する旋回流の3つの流動パターンが存在した<sup>(10)</sup>。
- (4)  $L = 4D_b$ 位置 (遷移領域) の断面で観察された管全体を支配する旋回流 (図3の (c)) が周期的に発生し、領域2に示すとおり、鉛直に下降することで、主流の侵入深さ $L_s$ の変動が発生している可能性がある<sup>(10)</sup>。(ここで $L$ は主流流路底部からの距離を示す)

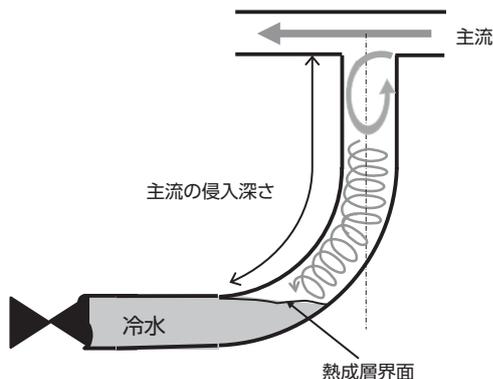


図1 水平部を有する閉塞分岐配管での壁温変動発生メカニズム

以上得られた知見を踏まえると、 $L = 4D_b$ 位置 (遷移領域) の断面で観察された管全体を支配する旋回流 (図3の (c)) の発生を抑制することで、主流の侵入深さやその変動を抑制できる可能性がある。本報では、分岐管断面の形状をこれまでの円管から矩形管、縮小管、拡大管に変更し、分岐管内の流動挙動に与える影響を調べた。

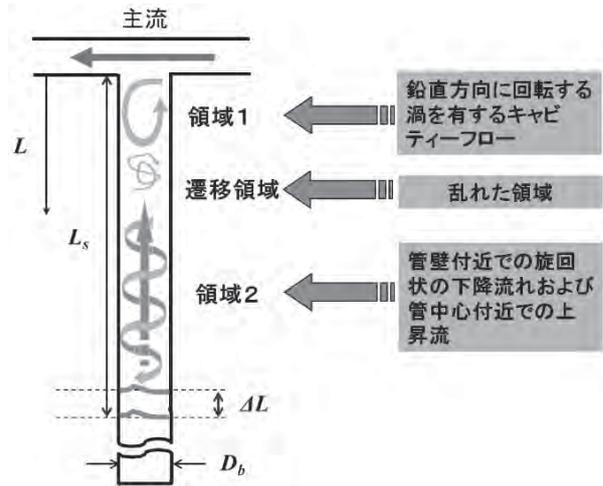


図2 鉛直下向き分岐管内の流動状態<sup>(8),(9)</sup>

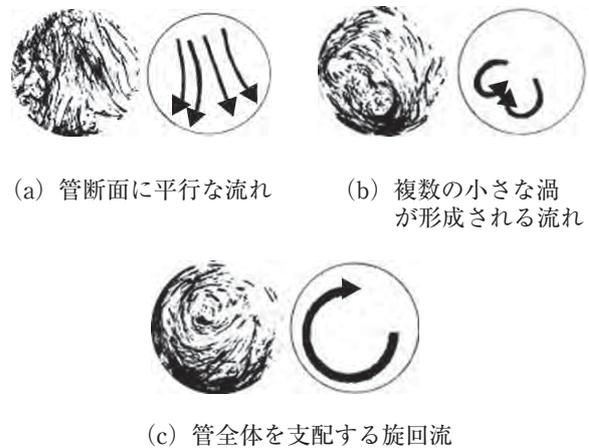


図3 分岐管断面上の流線画像と模式図<sup>(10)</sup>

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 実験ループ

図4に実験ループの概略図を示す。試験流体には脱気水を用い、ポンプ入熱による流体温度上昇を防ぐため、熱交換器の冷却水量により制御し、分岐配管には約25℃の水を滞留させ、主流温度を分岐配管内の温度と等温になるように調整した。流量はポンプ出口に設けた弁で調整し、主流流速 $U_m$ は試験

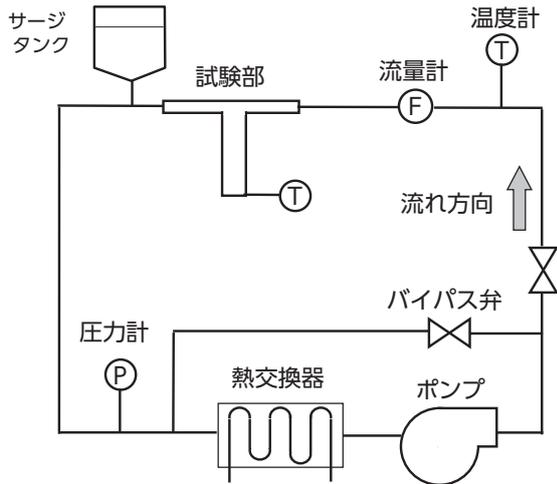


図4 実験ループの概略図

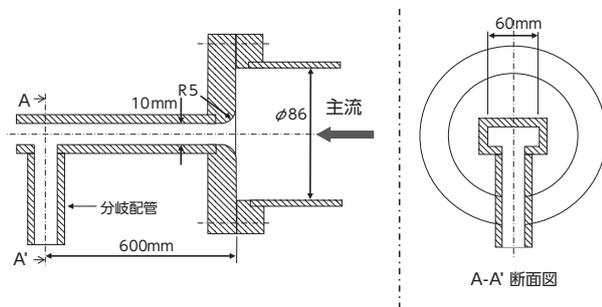


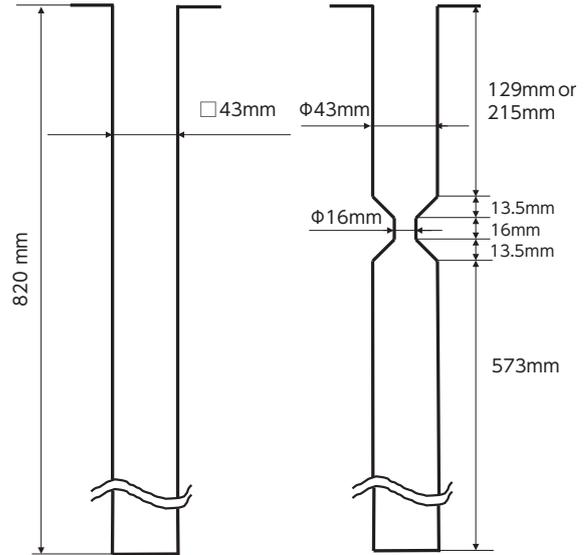
図5 試験部入口形状および主流流路形状

部上流の電磁流量計 (TOSHIBA 製, 精度  $\pm 0.5\%$  of Rate) により管断面平均値を測定した。

図5に試験部入口部の形状と主流流路形状を示す。十分な主流流速を得るため図5に示すとおり主流流路形状は幅60mm, 厚さ10mmの矩形流路とした。また, 主流が十分発達するように矩形流路入口から分岐部までの距離は600mmで主流流路の水力等価直径の約35倍とした。これらの形状は既報<sup>(9),(10)</sup>と同じとした。

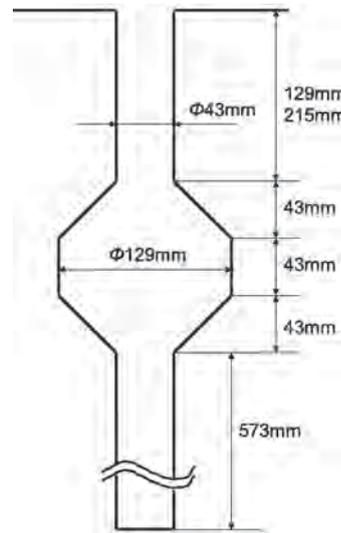
## 2.2 試験体

分岐管形状が流動挙動に与える影響を調べるために使用した試験体を図6 (a)~(c)に示す。試験体はアクリル製であり, 試験体 (a) は一辺43mmの矩形断面の分岐管 (以下, 矩形管という), 試験体 (b) は内径43mmの円管の一部を縮小させた管 (以下, 縮小管という), 試験体 (c) は内径43mmの円管の一部を拡大させた管 (以下, 拡大管という) である。1節で述べたとおり, これまでの知見から  $L = 4D_b$  位置 (遷移領域) の断面で観察された管全体



(a) 矩形管

(b) 縮小管



(c) 拡大管

図6 試験体の概略図

を支配する旋回流の発生を抑制することで, 主流の侵入深さやその変動を抑制できる可能性があることから, ここで縮小位置および拡大位置は,  $L = 3D_b$ ,  $5D_b$  ( $L = 129, 215\text{mm}$ ) の2ケースとした。

## 2.3 実験方法および条件

主流が分岐配管内部に侵入した際の管内の渦構造を調べるため, 前節で示した試験体を用い, 流れの可視化実験を行なった。主流の侵入深さおよび分岐管断面上の流動状態を観察するため, トレーサ粒子としてアルコールで濡れ性を良くした発砲スチロール製の粒子 (粒子径, 数百  $\mu\text{m}$  程度) を使用した。

侵入深さ $L_s$ は、分岐管側面から観察し、主配管底部からトレーサ粒子の動いている位置までを測定した。また、分岐管断面の様子は図7に示すとおり分岐管の真上から観察した。分岐管軸上の任意の断面を観察するため、黒画用紙でアクリル試験体を覆い、高さ約10 mmのスリットを設け、分岐配管側面から光を照射し、そのスリット位置を上下させた。

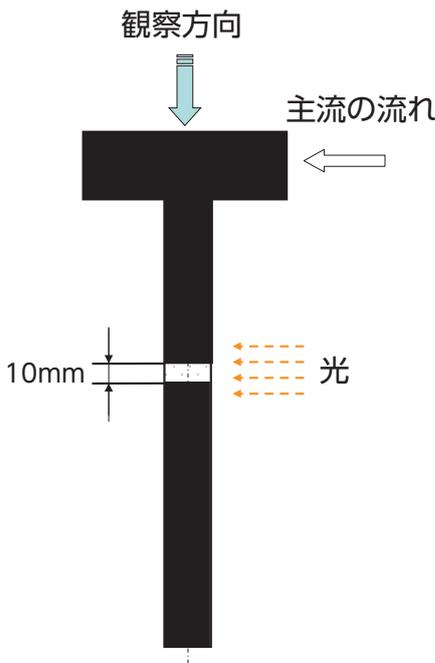


図7 分岐管断面の流動状態の観察方法

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 分岐管形状が流動挙動に与える影響

##### 3.1.1 矩形管

図8に矩形管において、分岐管側面からの観察結果から得られた流動様式の模式図を示す。図に示すとおり円管の場合と同様に鉛直方向に回転するキャビティフローとその直下の乱れた領域は観察されたが、図2の領域2にあたる旋回流の下降流れは観察されなかった。また、侵入深さの周期的な変動は観察されなかった。

次に、主流平均流速 $U_m = 4\sim 15\text{m/s}$ 、分岐管が円管（内径43mm）と矩形管の場合の主流の最大侵入深さ $L_{max}/D_e$ を図9に示す。 $L_{max}$ は、600秒間の侵入深さ $L_s$ の最大値であり、次式で定義される。水力等価直径 $D_e$ で無次元化して示した。

$$D_e = \frac{4A_f}{L_f} \tag{1}$$

ここで $A_f$ は矩形管の流路断面積、 $L_f$ は流路濡れ縁長さである。矩形管の水力等価直径 $D_e$ は43mmとなる。最大侵入深さは矩形管では、円管に比べ約半分となった。

矩形管において図2に示した領域2にあたる旋回流の下降流れが観察されなかった理由を調べるため分岐管断面上の可視化を行った。図10に $L = 4D_e$ 位置（図9の乱れた領域内）、 $U_m = 5\text{m/s}$ の場合の分岐管断面の可視化結果を示す。撮影は露光時間1/4秒に設定し、スチルカメラで行った。また、トレーサ粒子による流線をわかりやすくするため、画像を白黒に二値化した。図に示すとおり複数の小さな渦が形成される流れは観察されたが、円管の場合に確認できた管全体を支配する旋回流（図3の(c)）は観察できなかった。

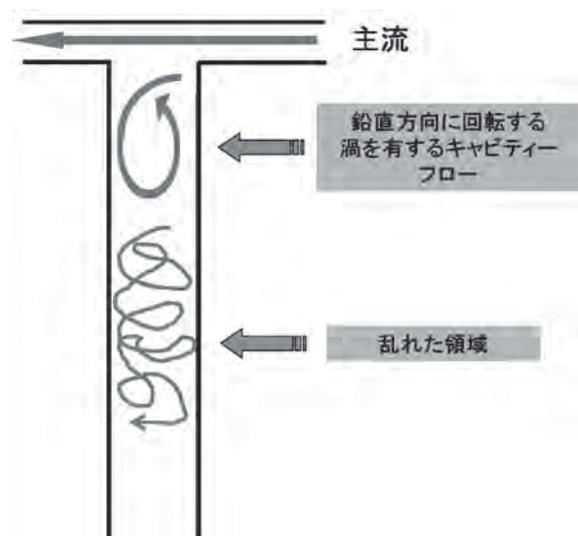


図8 鉛直下向き矩形管内の流動状態

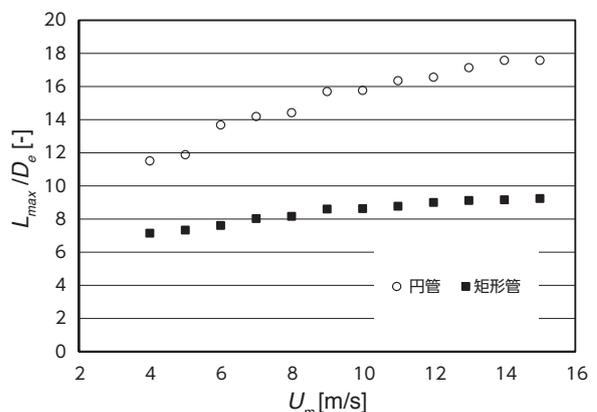


図9 主流の最大侵入深さ（円管，矩形管）

矩形管にすることでコーナー部に小さい渦が拡散することで、複数の小さな渦が形成されるにとどまり、管全体を支配する旋回流の発生が抑制され、旋回流の下降流れ（図2の領域2）および侵入深さの周期的な変動が観察されなかったと推定される。

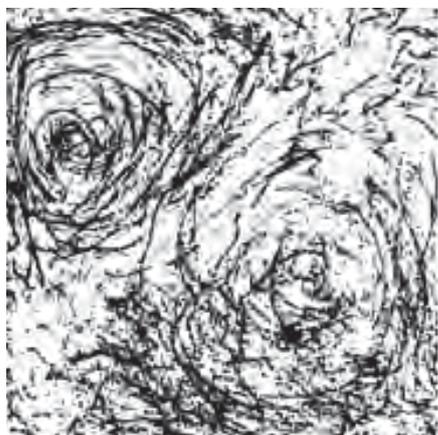


図10 矩形管断面上的の流線画像 ( $L=4D_b$  位置,  $U_m=5\text{m/s}$ )

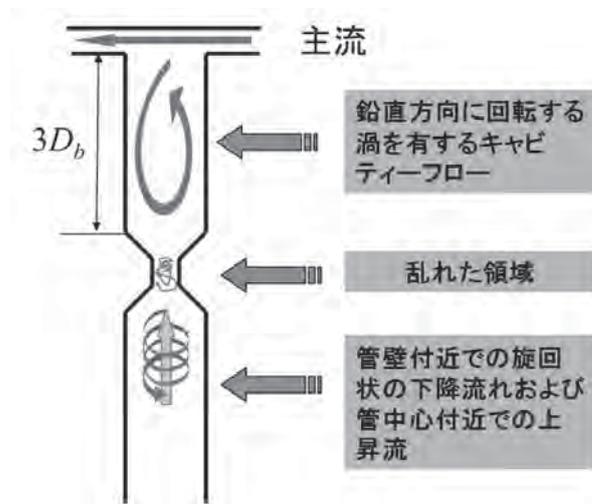
### 3.1.2 縮小管

本実験では、実機への適用性も考慮し、矩形管に加え、円管の一部を縮小させる縮小管の場合の観察も行った。図11に、分岐管側面からの観察結果から得られた流動様式の模式図を示す。図には縮小位置  $L = 3D_b, 5D_b$  の分岐管の観察結果を (a), (b) に示す。いずれの場合も図に示すとおり鉛直方向に回転するキャビティフロー領域とその直下の乱れた領域、領域2にあたる旋回流の下降流れが観察され、その流動様式は図2で示した円管の場合と同様であった。また、侵入深さの周期的な変動は円管同様に観察された。

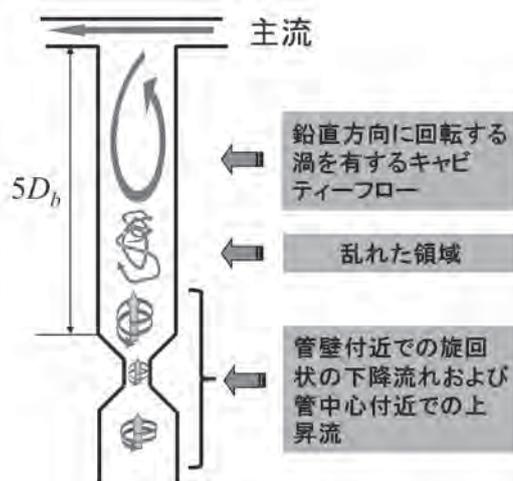
図12に主流平均流速  $U_m = 4\sim 15\text{m/s}$ 、分岐管を縮小管にした場合の主流の最大侵入深さ  $L_{max}/D_b$  を示す。最大侵入深さは、分岐管内径  $D_b$  で無次元化して示した。最大侵入深さは、縮小位置  $L = 3D_b, 5D_b$  のいずれの場合も、縮小部を設けていない円管の場合に比べ5割程度減少していた。

図13, 14に主流平均流速  $U_m = 4\sim 15\text{m/s}$ 、分岐管を縮小管にした場合の主流の侵入深さの変動周期、変動幅を示す。変動周期は600秒間のビデオ動画から周期的に発生する間隔を測定し平均した。変動周期はいずれの場合も円管の場合と比べ同程度であった。変動幅は600秒間のビデオ動画から周期的に変動する侵入深さ  $L_s$  の変動幅を測定し、平均した結果

を分岐管内径で無次元化して示した。侵入深さの変動幅  $\Delta L/D_b$  は、円管の場合に比べ増加する傾向がみられた。その要因については今後検討を要する。



(a) 縮小位置  $L = 3D_b$  の場合



(b) 縮小位置  $L = 5D_b$  の場合

図11 鉛直下向き縮小管内の流動状態

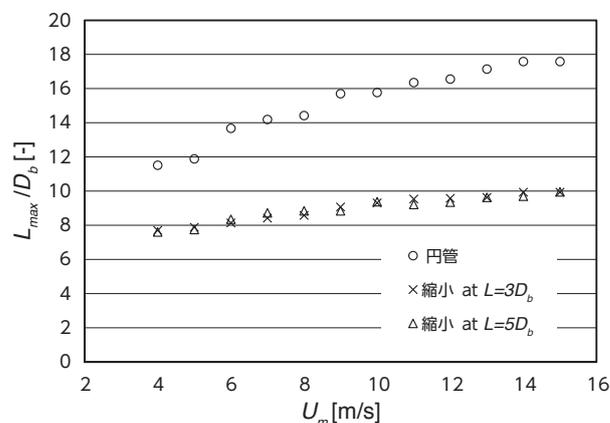


図12 主流の最大侵入深さ (円管, 縮小管)

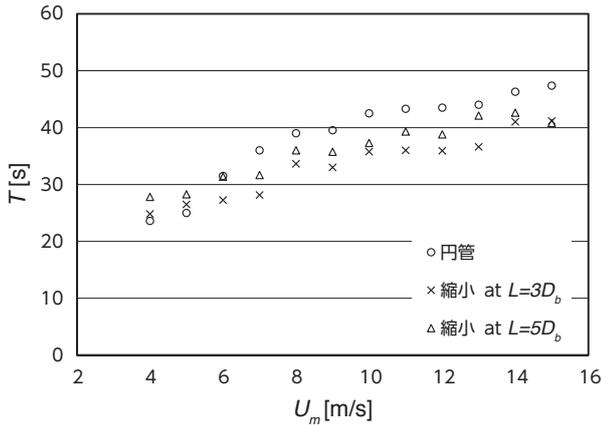


図13 侵入深さの変動周期 (円管, 縮小管)

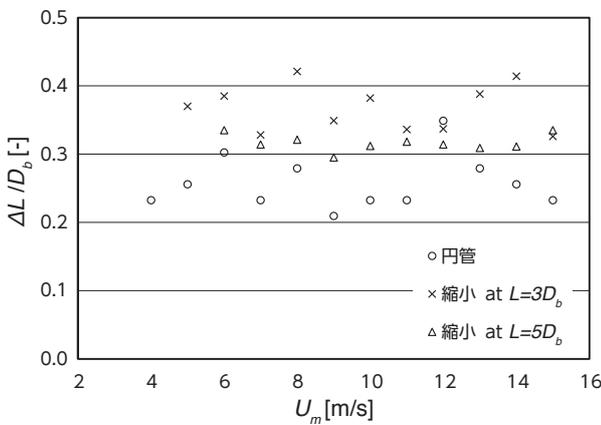
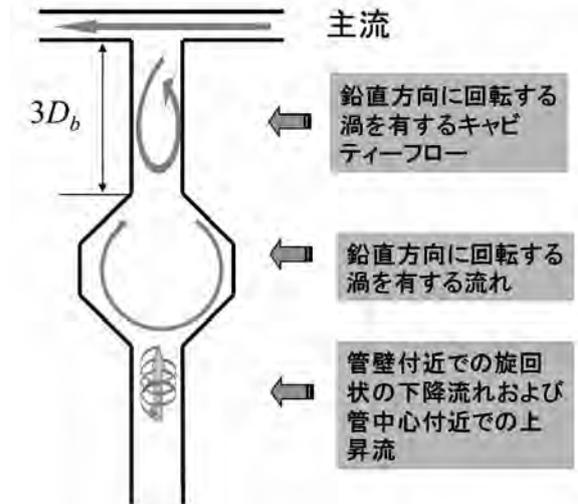


図14 侵入深さの変動幅 (円管, 縮小管)

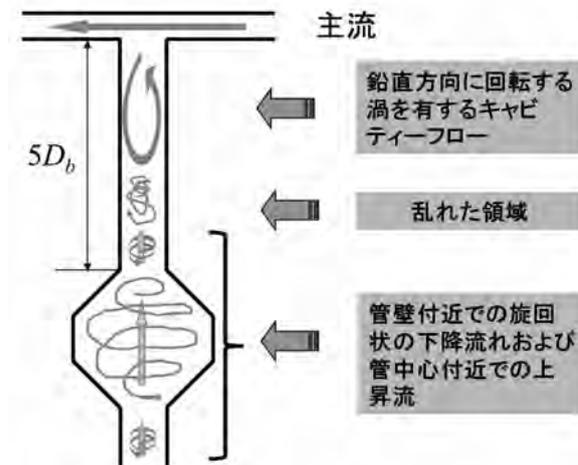
### 3.1.3 拡大管

次に、円管の一部を縮小させる縮小管に加え、円管の一部を拡大させる拡大管の観察も行った。図15に、分岐管側面からの観察結果から得られた流動様式の模式図を示す。図には拡大位置  $L = 3D_b$ ,  $5D_b$  の分岐管の観察結果を (a),(b) に示す。  $L = 3D_b$  の位置において拡大させた場合、円管の場合に観察されたキャビティフロー直下の乱れた領域は確認できなかったが、鉛直方向に回転する流れが観察された。一方、  $L = 5D_b$  の位置において拡大させた場合、その流動挙動は円管の場合と同じであった。いずれの場合も侵入深さの周期的な変動は円管同様に観察された。

図16に主流平均流速  $U_m = 4\sim 15\text{m/s}$ 、分岐管を拡大管にした場合の主流の最大侵入深さ  $L_{max}/D_b$  を示す。最大侵入深さは、分岐管内径  $D_b$  で無次元化して示した。最大侵入深さは、円管の場合に比べ減少したが、縮小管に比べると大きかった。また、より主配管に近い  $L = 3D_b$  の位置において拡大させた場



(a) 拡大位置  $L = 3D_b$  の場合



(b) 拡大位置  $L = 5D_b$  の場合

図15 鉛直下向き拡大管内の流動状態

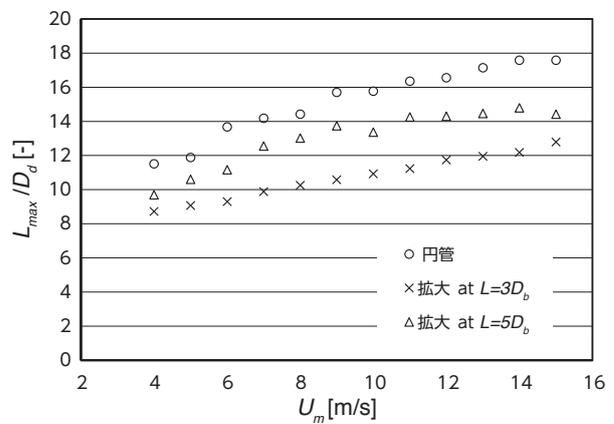


図16 主流の最大侵入深さ (円管, 拡大管)

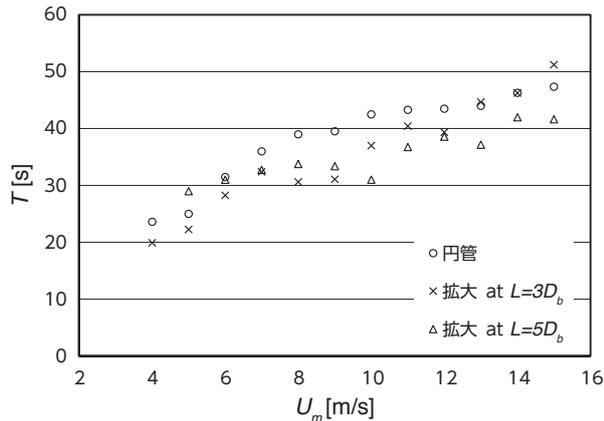


図17 侵入深さの変動周期（円管，拡大管）

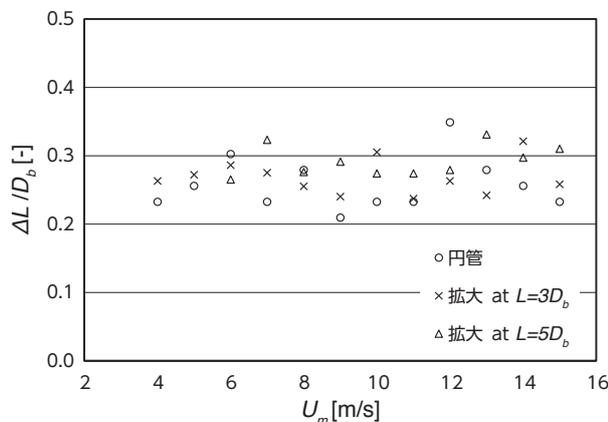


図18 侵入深さの変動幅（円管，拡大管）

合のほうがその減少幅は，大きかった。

図17, 18に主流平均流速  $U_m = 4 \sim 15 \text{ m/s}$ ，分岐管を拡大管にした場合の主流の侵入深さの変動周期，変動幅を示す。変動周期は600秒間のビデオ動画から周期的に発生する間隔を測定し平均した。変動周期はいずれの場合も円管の場合と比べ同程度であった。変動幅は600秒間のビデオ動画から周期的に変動する侵入深さ  $L_s$  の変動幅を測定し，平均した結果を分岐管内径で無次元化して示した。侵入深さの変動幅  $\Delta L/D_b$  は，円管の場合と同程度であった。

### 3.2 考察

本報では，実機適用の観点から，矩形管に加え，縮小管，拡大管を用い，分岐管形状が，主流の侵入深さおよびその変動特性に与える影響を調べた。その結果，キャビティフローから領域2への遷移領域である  $L = 3D_b, 5D_b$  位置で管径を縮小させた場合，主流の最大侵入深さは円管の場合に比べ約半分となった。1節で述べたとおり，指針では，高サイク

ル熱疲労を防止するため熱成層界面が曲がり部に存在しないよう確認している。仮に曲がり部に存在した場合，図19に示すとおり鉛直部に縮小部を設け，旋回流の先端部を鉛直部にとどめることで，熱疲労の発生を防止することが可能となる。現状の知見では，旋回流の先端部が曲がり部に存在した場合，鉛直部の長さを変更する等で対応しているが，本知見は，熱疲労を防止するための新たな手段の一つとして期待できる。

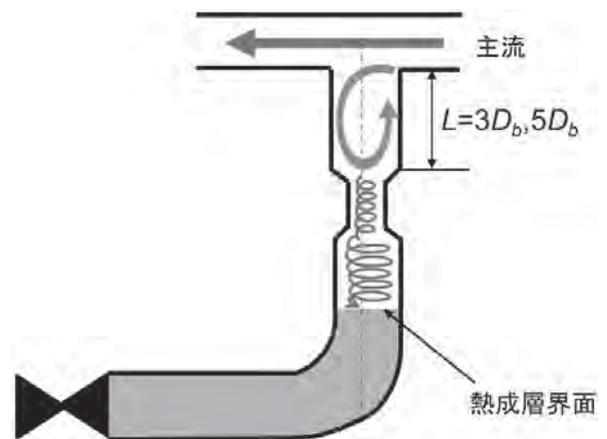


図19 縮小部を有する閉塞分岐配管の流動挙動

## 4. 結論

本研究では，分岐管内  $D_b = 43 \text{ mm}$  以下の下向き閉塞分岐配管を対象に分岐管形状が流動挙動に与える影響を調べた。流動挙動を調べた可視化実験では，これまでの円管に加え，矩形管，縮小管，拡大管を用いて観察を行った。その結果，得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 分岐配管を矩形管にした場合，鉛直方向に回転するキャビティフローとその直下の乱れた領域は観察されたが，円管の場合に確認された旋回流の下降流れおよび侵入深さの周期的な変動は観察されなかった。また，その最大侵入深さは円管の場合に比べ約半分となった。
- (2) 矩形管の場合， $L = 4D_b$  位置において分岐管断面の流動パターンを観察した。その結果，管全体を支配する旋回流は観察されず，複数の小さな渦が形成される流れが観察された。 $L = 4D_b$  位置における管全体を支配する旋回流の発生が抑制されることで，主流の侵入深さの変動が抑制されたと考えられる。

- (3) 分岐配管の一部を  $L = 3D_b, 5D_b$  の位置において縮小させた場合、管内の流動挙動は通常の円管の場合と同じであり、侵入深さの周期的な変動も観察され、変動幅  $\Delta L/D_b$  は円管に比べ増加する傾向が確認されたが、その周期は円管の場合と同程度であった。しかしながら、主流の最大侵入深さは円管の場合に比べ約半分となった。
- (4) 分岐配管の一部を  $L = 3D_b$  の位置において拡大させた場合、円管の場合に観察されたキャビティフロー直下の乱れた領域は確認できなかったが、鉛直方向に回転する流れが観察された。一方、 $L = 5D_b$  の位置において拡大させた場合、その流動挙動は円管の場合と同じであった。最大侵入深さは、いずれの場合も円管の場合に比べ減少したが、縮小管の場合よりは大きかった。また、侵入深さの周期的な変動は円管の場合と同様に観察され、その変動幅  $\Delta L/D_b$  および変動周期は同程度であった。

## 文献

- (1) 中森信夫, 鈴木忠彦, 上野隆司, 笠原二郎, 半沢克巳, 桶谷浩一郎, 鶴飼修, 枝管内における熱成層現象, 第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集, D252 (1993), pp. 646-648.
- (2) 関西電力株式会社, 美浜発電所2号機の点検結果について(余剰抽出水系統配管からの漏えいの原因と対策), プレスリリース1999年分, < <http://www1.kepco.co.jp/pressre/1999/0525-1j.html> >, (参照日2013年9月20日).
- (3) Nuclear Regulatory Commission, Assessment of pressurized water reactor primary system leaks, US NRC, NUREG / CR-6582 (1999).
- (4) 日本機械学会編, 配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針, 初版 (2003), 日本機械学会.
- (5) 近藤喜之, 谷本浩一, 白石直, 鈴木盛喜, 小倉健志, 椎名孝次, 福田俊彦, 千種直樹, 守屋祥一, 滞留部の熱成層化による高サイクル熱疲労に関する研究 (Lsh評価手法の概要), 日本機械学会論文集B編, Vol. 70, No. 689 (2004), pp.178-191.
- (6) 椎名孝次, 河村勉, 大塚雅哉, 水野正, 久恒真一, 小倉健志, 谷本浩一, 福田俊彦, 南安彦, 守屋祥一, 班目春樹, 閉塞分岐滞留部の熱成層化による水平管内渦侵入深さ予測 (温度変動特性に及ぼす放熱条件の影響), 日本機械学会論文集B編, Vol. 71, No. 703 (2005), pp.954-961.
- (7) 谷本浩一, 白石直, 鈴木盛喜, 小倉健志, 椎名孝次, 福田俊彦, 南安彦, 守屋祥一, 滞留部の熱成層化による高サイクル熱疲労に関する研究 (L1評価手法の概要), 日本機械学会論文集B編, Vol. 70, No. 689 (2004), pp.176-183.
- (8) 大厩徹, 中村晶, 長谷正紹, 細川茂雄, 竹中信幸, 下向き閉塞分岐配管に生じる流動と温度変動のメカニズム - 第1報 鉛直分岐配管に生じる流動現象 -, 日本機械学会論文集B編, Vol. 75, No. 749 (2009), pp.68-76.
- (9) 三好弘二, 中村晶, 土蔵孝博, 杉本勝美, 竹中信幸, 下向き閉塞分岐配管に生じる流動と温度変動のメカニズム (第4報, 配管内径が侵入深さおよび変動特性に及ぼす影響), 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 810 (2014), DOI:10.1299/transjsme.2014fe0026.
- (10) 三好弘二, 中村晶, 土蔵孝博, 杉本勝美, 竹中信幸, 下向き閉塞分岐配管に生じる流動と温度変動のメカニズム (第5報, 侵入深さの変動メカニズムの解明), 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 817 (2014), DOI:10.1299/transjsme.2014fe0255.